

Plasmas Granulares

Luis Conde, José Manuel Donoso, Antonio Sánchez-Torres, Igor Mijail Tkachenko, Eduardo de la Cal, Daniel Carralero y José Luis de Pablos

Los plasmas granulares son gases total o parcialmente ionizados que, además de iones electrones y átomos neutros, contienen partículas sólidas con carga eléctrica. Dichas partículas cargadas, de tamaño mesoscópico, dan lugar a nuevos fenómenos colectivos con una dinámica característica. Este tipo de plasmas aparecen en sistemas físicos tan diversos como son los reactores de fusión por confinamiento magnético, los sistemas de procesamiento de semiconductores o en medios astrofísicos. Se presenta una breve introducción divulgativa a esta nueva rama de la física de plasmas que ha tenido un desarrollo espectacular en los últimos años, haciendo énfasis en su carácter multidisciplinar.

1. Introducción

Los plasmas granulares (*dusty plasmas*) son gases total o parcialmente ionizados, que además de iones y electrones contienen partículas sólidas eléctricamente cargadas, granos de polvo de materiales dieléctricos o metálicos con tamaños que van desde lo microscópico a lo mesoscópico. Estas macropartículas cargadas, dan lugar a un tipo de plasma que está presente en mayor o menor medida en cualquier plasma natural o de laboratorio y que es objeto de estudio multidisciplinar desde hace más de dos décadas [1,2,3,4]. A pesar de su pequeño tamaño, en relación con las dimensiones características del sistema en el que aparecen, la masa de estos granos cargados es enorme comparada con la de los iones y pueden también adquirir una elevada carga eléctrica, hasta $Z = 10^4$ veces la del electrón. Las fuerzas gravitatorias y electromagnéticas gobiernan el comportamiento dinámico de las partículas de polvo que afectan a todo el sistema y producen fenómenos singulares [1,3,5].

La presencia de partículas mesoscópicas cargadas, granos o impurezas, en cualquier plasma es inevitable. Por ejemplo, la fotografía de la figura 1 muestra un plasma granular donde los puntos brillantes son partículas sólidas, de un tamaño de unas tres micras, iluminadas por luz láser [6]. A pesar de su similitud aparente con un fluido ordinario, no es éste el

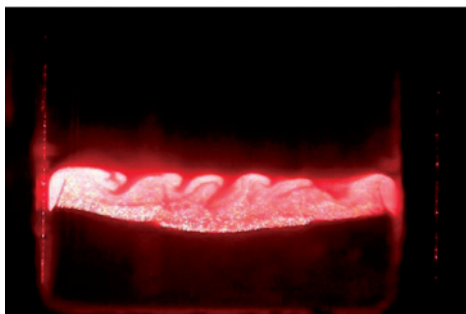


Fig.1. Fotografía de un plasma granular. Los puntos brillantes son los granos de polvo de CeO_2 iluminados por la luz láser [6].

caso. La presión del gas es muy próxima a la atmosférica y los granos se caerían por su peso, sin embargo, levitan en el campo eléctrico vertical de la vaina electrostática formada en la superficie inferior que equilibra a la fuerza de gravedad. Además, efectúan movimientos colectivos formando estructuras debido a las fluctuaciones y ondas que alteran el campo eléctrico interno del plasma, originado tanto por los iones y electrones como por la carga eléctrica de los granos de polvo.

El interés científico y tecnológico de los plasmas granulares reúne campos tan distantes como son los sistemas para el procesamiento de materiales semiconductores, los plasmas en la Astrofísica o los futuros reactores de fusión nuclear controlada [1,5]. Se trata de una nueva rama de la Física de Plasmas que crece cada año con nuevas aportaciones. A continuación desarrollaremos una sucinta introducción de algunos aspectos básicos de este tipo de plasma, el lector encontrará una presentación sistemática de la teoría y sus aplicaciones más recientes en las obras citadas en la bibliografía [1,3,5].

2. Plasmas granulares en la naturaleza y en el laboratorio

Ningún sistema en la naturaleza o en el laboratorio está exento de la contaminación por partículas pequeñas. El origen de las partículas sólidas susceptibles de adquirir carga en un plasma es variado, depende de las propiedades del mismo y de los procesos elementales que tienen lugar. Así, por ejemplo, durante el procesamiento de materiales semiconductores, el grabado de las obleas (*waffer etching*) se efectúa en un plasma producido en una mezcla de argón y silano (SiH_4) que reacciona con el oxígeno dando lugar a partículas de óxido de silicio (SiO_2). Dichas partículas crecen durante el proceso desde un tamaño de unos pocos nanómetros hasta alcanzar micras y se cargan recogiendo electrones del plasma. Estos granos quedan suspendidos por

desarrollan en los experimentos de fusión o la mayor parte de los que se encontramos en medios astrofísicos. Son también plasmas débilmente acoplados los de las figuras 1 y 2.

5. Sumario

La Física de los Plasmas Granulares tiene aplicaciones en múltiples campos científicos y tecnológicos. En los últimos años ha tenido un desarrollo espectacular y en esta breve introducción hemos omitido otros muchos fenómenos interesantes, como son las ondas de choque, los huecos de carga granular (*dust voids*), vórtices,... etc. Tampoco hemos mencionado en detalle las posibles aplicaciones de este tipo de plasma ni las líneas de investigación más recientes. Remitimos al lector interesado a las referencias citadas en la bibliografía donde encontrará una exposición sistemática de los nuevos avances.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Prof. A.V. Filippov la fotografía de la figura 2 así como la financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación mediante los proyectos AYA2008-047769, beca FPI BES-2009-013319 y ENE2010-21116-C02-01 y 02.

Referencias

- [1] SHUKLA, P.K. Y MAMUN, A.A., *Introduction to Dusty Plasma Physics* (IOP, Bristol, 2002).
- [2] FORTOV, V.E., IVLEV, A.V., KHRAPAK, S.A., A.G. KHRAPAK, MORFILL, G.E. *Complex (dusty) plasmas: Current status, open issues, perspectives* Phys. Rep. **421**, pags. 1-103 (2005).
- [3] Shukla, P.K. y Eliasson, B. *Colloquium: Fundamentals of Dust Plasma Interactions*. Rev. Mod. Phys. **81**, (1), pags. 25-44 (2009).
- [4] TSYTOVICH, V.N., MORFILL, G., VLADIMIROV, S.V., THOMAS, H.M. *Elementary Physics of Complex Plasmas (Lecture Notes in Physics)*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2008).
- [5] MERLINO, R.L. Y GOREE, J.A. *Dusty Plasmas in the Laboratory, Industry, and Space*. Phys. Today **57**, (7), pags. 32-38 (2004).
- [6] FILIPPOV, A.V., BABICHEV, V.N., DYATKO, N.A., PAL, A.F., STAROSTIN, A.N., TARAN, M.D., FORTOV, V.E. *Formation of Plasma Dust Structures at Atmospheric Pressure*. J. Exp. Theor. Phys. **102**, (2), pags. 342-354 (2006).
- [7] KARSHENINNIKOV, S.I. ET AL. *Recent progress in understanding the behavior of dust in fusion devices*. Plasma Phys. Control. Fusion. **50**, (2), 124054 (2008).
- [8] El vídeo con la película completa a que corresponde la figura 2 se encuentra en: http://fusionwiki.ciemat.es/fusionwiki/index.php/TJ-II:Fast_camera
- [9] Un video donde se observan las cuñas radiales de los anillos de Saturno se encuentra en la dirección: <http://www.youtube.com/watch?v=7XJj0pjumwE&feature=related>

Luis Conde, José Manuel Donoso y Antonio Sánchez-Torres

Dpto. Física Aplicada. E.T.S.I. Aeronáuticos,
U. Politécnica de Madrid

Igor Mijail Tkachenko

Dpto. Matemática Aplicada. E.T.S.I. Industriales,
U. Politécnica de Valencia

Eduardo de la Cal, Daniel Carralero y José Luis de Pablos

Laboratorio Nacional de Fusión. Ciemat. Madrid

INSTITUTO PLURIDISCIPLINAR-UCM, MADRID (SPAIN)
SEPTEMBER 12-16, 2011

A WEEK OF SCIENCE



To celebrate the
70th birthday (sept. 7th, real; 14th, legal; 2011)

Prof. Manuel G. Velarde

(<http://www.ucm.es/info/fluidos>)

And at his request to also celebrate the birthday of his colleagues and friends

prof. *Iván B. Ivanov* (sept. 6th), prof. *Gregoire Nicolis* (sept. 11th), maestro *Tomás Marco* (sept. 12th), prof. *John J. Kozak* (sept. 14th), prof. *Werner Ebeling* (sept. 15th), Dr. *Benoit Scheid* (sept. 15th) and Museum Curator Dr. *Rafael García Serrano* (sept. 16th)